第46卷 第3期
2023年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 3
Mar. 2023

近60 a山西省极端气温事件的年际变化及其对区域增暖的响应

李 娜[1]， 武永利[1]， 赵桂香[1]， 钱锦霞[1]， 李 芬[2]， 赵海英[1]， 韩 普[1]

（1. 山西省气象台，山西 太原 030006；2. 山西省气象灾害防御技术中心，山西 太原 030032）

摘 要： 基于山西省境内70个气象站点的逐日最高气温、最低气温和平均气温资料，使用8个不同的极端气温指数分析其1960—2019年近60 a极端气温事件的变化特征，并分析其对气候变暖的响应。结果表明：（1）夏季日数、热夜日数、日最低气温极大值、日最低气温极小值均呈显著增加趋势，冰冻日数、霜冻日数呈显著减少趋势。（2）极端最高（低）气温的极大、极小值均上升，并且大部分地区极端气温的极小值增温幅度更大。（3）山西省平均气温呈显著变暖趋势，平均每10 a增加0.26 ℃，空间上气温增幅呈从东南向西北逐渐增大的趋势。各极端气温指数对气候变暖具有较好的响应，其中霜冻日数对于山西省区域增暖的响应最显著，其次为日最低气温极大值。（4）山西省半干旱区的日最低气温极小、极大值增温更快，冰冻日数减少速度快；半湿润区的热夜日数增加速度快，霜冻日数减少速度快。

关 键 词： 极端气温指数；时空变化；气候变化；山西省

文章编号： 1000－6060(2023)03－0337－12(0337～0348)

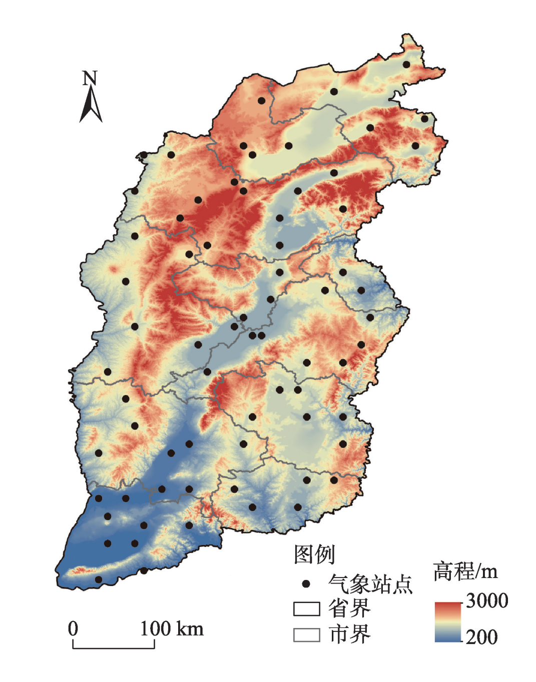
近百年来，全球气候变暖受到广泛关注，其中20世纪50年代后的气温上升更是前所未有[1-2]。IPCC第五次、第六次评估报告指出了1880年以来全球海陆表面气温的变化特征，指出相对于1850—1900年，2010—2019年全球平均表面气温升高0.9~1.2 ℃[3-4]。气温的升高伴随着极端值的变化，造成气候系统的不稳定性增强。全球变暖背景下“暖冬”、高温及其伴随的干旱等极端气候事件的发生频率和强度更高、影响范围更大，会对生态环境[5-7]、农业生产[8-9]等造成严重影响。准确掌握极端气温事件的变化特征及其演变规律，并评估区域气候变暖背景下极端气温事件的强度和频率的变化，对于灾害事件预警、应对气候变化、生态环境保护等均有重要参考价值。

各国学者从不同角度对极端气温做了大量的研究。全球范围内，大部分地区极端气温的变化出现暖夜增多、冷夜减少的特点[10]；针对不同区域而言，北美[11]、印度[12]和俄罗斯[13]等地的研究呈现极端气温增暖显著、极端低温指数比高温指数变化更显著的特点。为增加不同区域极端气温研究结果的可比性及系统性，世界气象组织“气候变化检测和指标”研究组推荐了一系列极端气温指数。这些指数可反映出极端气温不同方面的变化，具有显著性强、噪声低的特点，为全面、客观、科学的认识全球和区域的陆地极端气候变化规律提供了支撑[14-15]。基于上述指数，针对我国不同地区、不同地形条件下的极端气温变化已有诸多研究[16-17]。分析表明，受不同区域独特地形地貌的影响，极端气温变化格局存在一定差异。同时，针对青藏高原[18-19]、秦岭[20-21]、西藏[22]、青海[23-24]等山地丘陵地区的研究发现，极端气温变化幅度的区域差异性与地理环境因子存在一定的相关性。综合认识不同地理环境下区域极端

收稿日期： 2022-06-15； **修订日期：** 2022-07-24
基金项目： 中国气象局创新发展专项(CXFZ2021J052)；山西省重点研发计划(201903D321006，20110311040-1)资助
作者简介： 李娜(1985-)，女，硕士，高级工程师，主要从事气候变化及气象灾害研究. E-mail: nali85@163.com
通讯作者： 武永利(1965-)，男，本科，正高级工程师，主要从事区域精细化预报及气象灾害研究. E-mail: wu_yongli@sina.com

气温事件的空间差异,是提升极端气温事件的预测与预警能力的基础。

山西省位于黄土高原东部、华北平原西侧,介于太行山与黄河中游峡谷之间,是起伏较大的山地型高原,也称山西高原[25]。境内地形复杂、水文下垫面条件差异显著,是我国半湿润与半干旱、暖温带与温带过渡区[25-27]。有研究表明,半干旱区极端气温暖指数上升速率较快,增温效应更明显;而半湿润区的日最高气温极大值增速较高,受到高温热浪的危害会更严重[28]。山西省境内复杂的地理环境和气候过渡的特征使得不同区域极端气温事件对气候变化的响应幅度差异性增大,增加了生态环境的脆弱性。本文拟基于山西省境内70个基本气象站1960—2019年逐日最高气温、最低气温、平均气温资料,选取8个极端气温指数,分析山西省极端气温事件的变化特征,并研究极端气温事件对区域增暖的响应差异,以科学认识未来气候变暖背景下山西省极端气温事件的变化状况。



注:该图基于山西省自然资源厅标准地图服务网站下载的审图号为晋S(2021)005号的标准地图制作,底图边界无修改。下同。

图1 山西省地形及所选气象站点的分布

Fig. 1 Topography and distribution of the selected meteorological sites in Shanxi Province

1 研究区概况

山西省(110°15′~114°32′E,34°35′~40°45′N)山地、丘陵面积分别占40.0%、40.3%,平原面积占19.7%。境内地形起伏大,气候存在显著的南北变化及垂直变化,其中恒山山脉、内长城以北属温带半干旱气候,内长城与昔阳—太岳山—河津一线之间属暖温带半干旱气候,此线以南属暖温带半湿润气候。根据气候区的划分,可大致将山西省划分为3个区域,即山西省北部(温带半干旱区)、中部(暖温带半干旱区)和南部(暖温带半湿润区)[25-27]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文选用山西省境内较均匀分布、空间代表性较好的70个基本气象站1960—2019年60 a间逐日最高气温、最低气温、平均气温资料(图1),该资料来自山西省气象信息中心。所用气象数据均通过了标准正态一致性检验的验证。

2.2 研究方法

本文选取世界气象组织推荐的夏季日数、冰冻日数、热夜日数、霜冻日数、日最高气温极大值、日最高气温极小值、日最低气温极大值、日最低气温极小值8个极端气温指数进行分析。参考周雅清等[15]、姬霖等[28]的研究方法,将不同极端气温指数分为2种类型(表1),其中暖指数包含4个指数,冷指数包含4个指数,采用线性趋势拟合、相关性分析法来进行数据分析[29]。

3 结果与分析

3.1 极端气温指数暖指数变化

3.1.1 极端气温指数暖指数的时间变化特征 1960—2019年,夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值多年均值分别为105.60 d·a^{-1}、17.50 d·a^{-1}、35.58 ℃·a^{-1}、22.74 ℃·a^{-1}。由山西省1960—2019年暖指数的年际变化趋势(图2)可以看出,暖指数均呈增加趋势,夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值平均每10 a依次增加3.10 d、1.40 d、0.16 ℃、0.20 ℃,其中夏季日数、热夜日数、日最低气温极大值的增加趋势极显著(P<0.001)。同时,夏季日数的增长率大于热夜日数,日最低气温极大值的增长率大于日最高气温极大值。分年代来看,夏季日数在20世纪70年代出现了短暂的下降,80年代缓慢增加,90年代上升趋

表1　极端气温指数定义

Tab. 1　Definitions of extreme air temperature indices

类型	指数	代码	定义
暖指数	夏季日数/d	SU	一年中日最高气温高于25 ℃的天数总和
	热夜日数/d	TR	一年中日最低气温高于20 ℃的天数总和
	日最高气温极大值/℃	TXx	年内日最高气温最大值
	日最低气温极大值/℃	TNx	年内日最低气温最大值
冷指数	冰冻日数/d	ID	一年中日最高气温低于0 ℃的天数总和
	霜冻日数/d	FD	一年中日最低气温低于0 ℃的天数总和
	日最高气温极小值/℃	TXn	年内日最高气温最小值
	日最低气温极小值/℃	TNn	年内日最低气温最小值

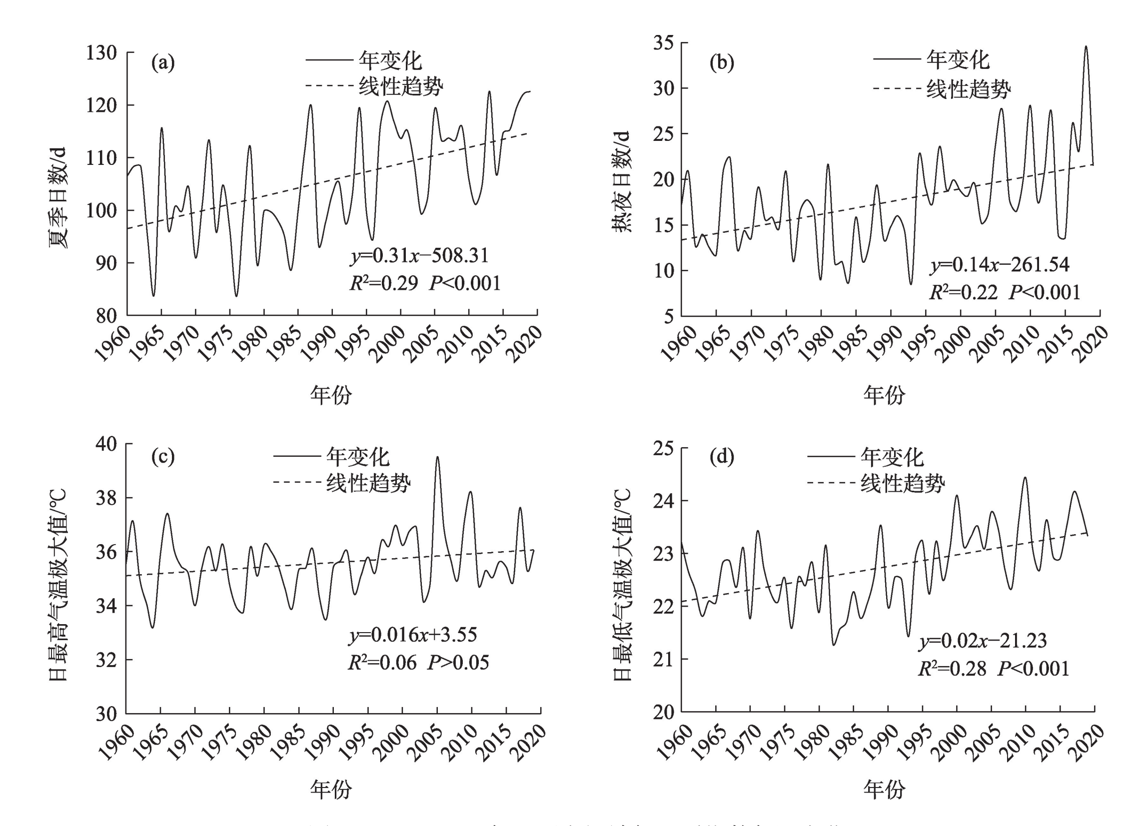


图2　1960—2019年山西省极端气温暖指数年际变化

Fig. 2　Annual variations of extreme warm indices in Shanxi Province from 1960 to 2019

势最明显，之后继续缓慢上升；热夜日数在20世纪60年代和70年代变动不大，80年代出现了明显下降，90年代以来上升趋势明显；日最高气温极大值在20世纪60年代至80年代变动不大，之后缓慢上升，至21世纪前10 a升至36.30 ℃，近10 a略有下降；日最低气温极大值以20世纪80年代为转折点，由降温转变为升温。

3.1.2　极端气温指数暖指数的空间变化特征　1960—2019年，山西省不同区域的夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值分布趋势呈南高北低的特点；近60 a不同区域的夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值的气候倾向率表现为一致的增加趋势，但增速差异较大（图3）。从各指数变化趋势的空间分布来看，夏季日数出现2个增幅高值区，为忻州市西部的河曲县、保德县、偏关县和临汾市西北部地区，均位于黄河沿岸，增幅超过3.79 d·$(10a)^{-1}$，忻州市中部以及山西省中南部的偏东地区增加幅度较小，不足2.73 d·$(10a)^{-1}$，96%台站的夏季日数显著增加（$P<0.05$）；热夜日数增幅高值区出现在临汾市南部和运城市北部，增幅超过2.45 d·$(10a)^{-1}$，北部大部和阳泉市、晋中市、长治市增加幅度较小，不足1.22 d·$(10a)^{-1}$，

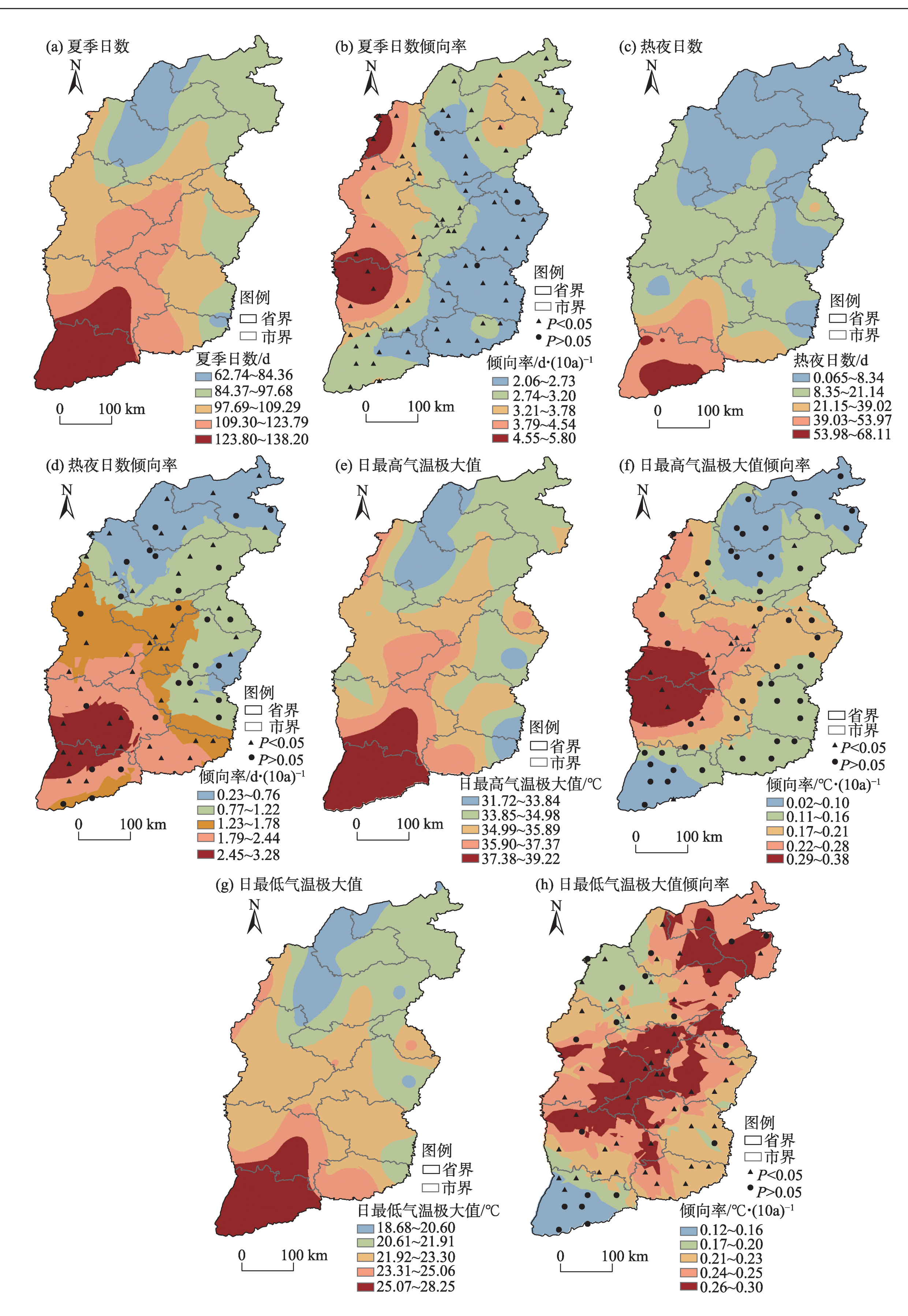


图3 山西省极端气温暖指数空间分布及变化趋势

Fig. 3 Spatial distributions of extreme warm indices and their linear trends in Shanxi Province

64%台站的热夜日数显著增加(P<0.05)；日最高气温极大值增幅高值区位于吕梁市南部、临汾市北部，其次为忻州市和吕梁市的黄河沿岸地区以及太原市南部、晋中市西部，增幅超过0.22 ℃·(10a)$^{-1}$，大同市、朔州市、忻州市和运城市为增幅低值区，增幅小于0.10 ℃·(10a)$^{-1}$，27%台站的日最高气温极大值显著增加(P<0.05)，主要位于增幅超过0.16 ℃·(10a)$^{-1}$的高值区；日最低气温极大值增幅高值区位于大同市东部、朔州市东部、阳泉市北部、太原市大部、晋中市西部、吕梁市东部、临汾市北部，增幅超过0.26 ℃·(10a)$^{-1}$，忻州市西部和运城市为增幅低值区，增幅小于0.16 ℃·(10a)$^{-1}$，73%台站的日最低气温极大值显著增加(P<0.05)，大部分位于增幅超过0.20 ℃·(10a)$^{-1}$的地区。对比山西省北中部半干旱区与南部半湿润区，半干旱区的日最低气温极大值增温更快，半湿润区的热夜日数增加速度快。

3.2 极端气温指数冷指数变化

3.2.1 极端气温指数冷指数的时间变化特征 1960—2019年，冰冻日数、霜冻日数、日最高气温极小值、日最低气温极小值多年均值分别为31.02 d·a^{-1}、141.48 d·a^{-1}、−7.93 ℃·a^{-1}、−20.22 ℃·a^{-1}。由山西省1960—2019年冷指数的年际变化趋势(图4)可以看出，冰冻日数、霜冻日数呈不同幅度的减少趋势，日最高气温极小值、日最低气温极小值呈增加趋势。冰冻日数、霜冻日数、日最高气温极小值、日最低气温极小值气候倾向率依次为−2.70 d·(10a)$^{-1}$、−2.90 d·(10a)$^{-1}$、0.25 ℃·(10a)$^{-1}$、0.38 ℃·(10a)$^{-1}$，其中，冰冻日数、霜冻日数极显著减少(P<0.001)，日最低气温极小值显著增加(P<0.01)，日最高气温极小值的增加趋势不显著(P>0.05)。对比发现，冰冻日数的减少率与霜冻日数相近；日最低气温极小值、日最高气温极小值、日最低气温极大值、日最高气温极大值增长率依次递减，10 a增长率依次为0.38 ℃、0.25 ℃、0.20 ℃、0.16 ℃，表明日最低气温极小值上升速度更快，气候变化对日最低气温极值影响更大。分年代来看，冰冻日数总体呈逐年代下降的趋势，在20世纪90年代为最低，21世纪前10 a出现了短暂的上升，之后转为下降趋势；霜冻日数在20世纪60年代至80年代变动不大，之后逐步下降；日最高气温极小值在20世纪90年代之后波动较大，20世纪90年代和近10 a为2个高值区间；日最低气温极小值总体呈逐年代上升的趋势。

3.2.2 极端气温指数冷指数的空间变化特征 1960—2019年，山西省不同区域的冰冻日数、霜冻日数分布趋势呈北高南低的特点，变化趋势表现为一致的减少趋势；日最高气温极小值、日最低气温极小值分布趋势呈南高北低的特点，表现为一致的增加趋势(图5)。近60 a不同区域的冰冻日数、霜冻日数、

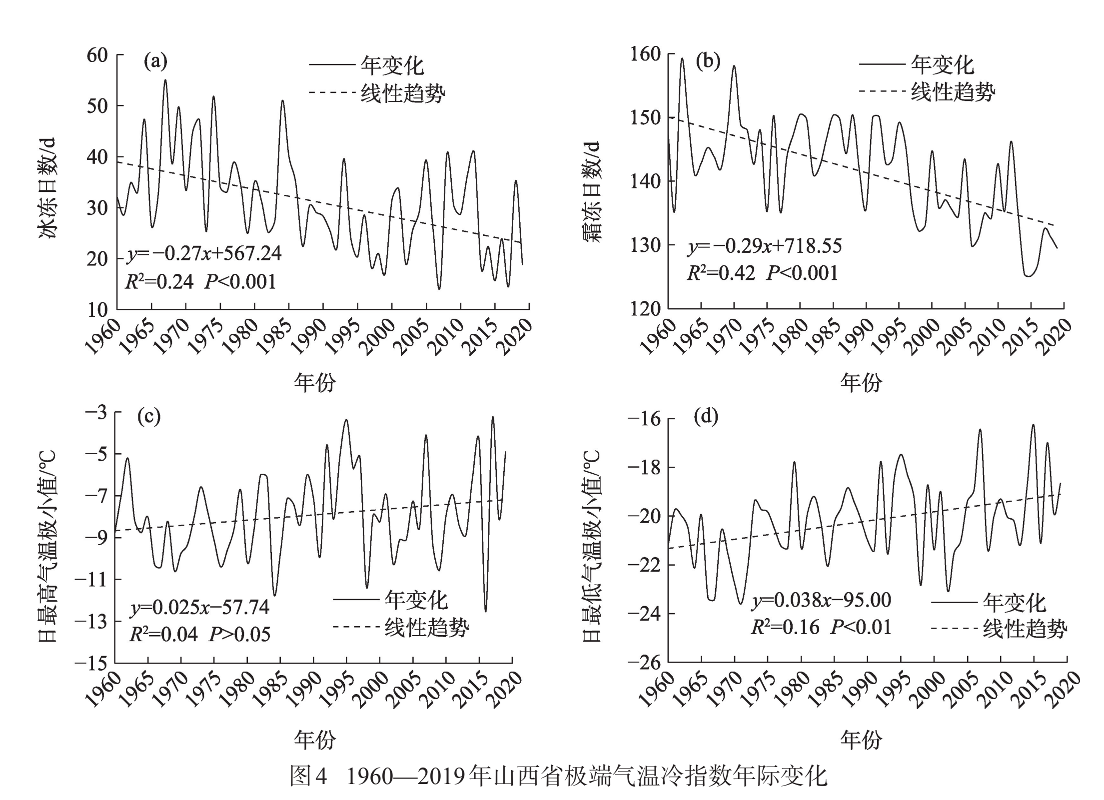


图4 1960—2019年山西省极端气温冷指数年际变化

Fig. 4 Annual variations of extreme cold indices in Shanxi Province from 1960 to 2019

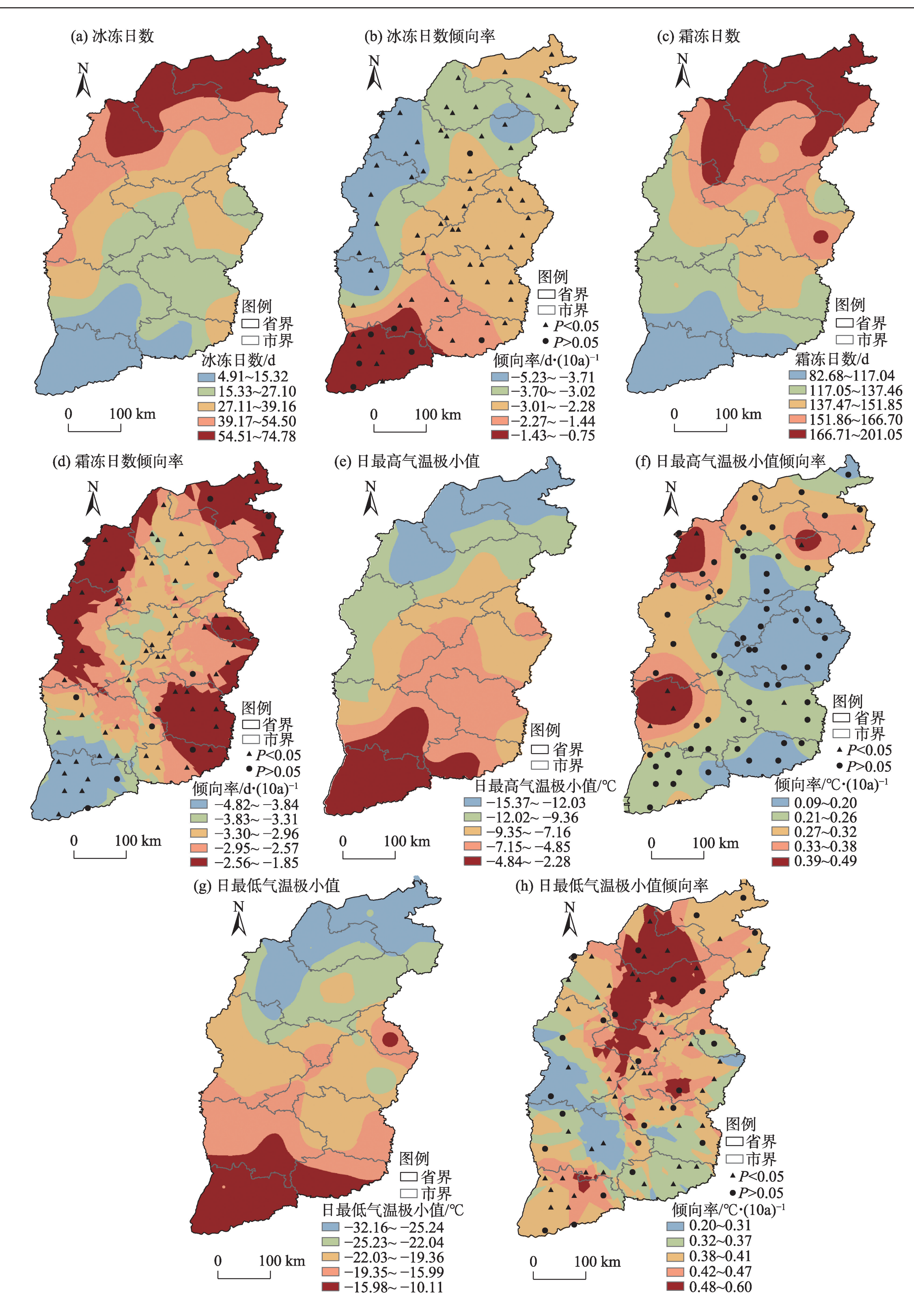


图5 山西省极端气温冷指数的空间分布及变化趋势

Fig. 5 Spatial distributions of extreme cold indices and their linear trends in Shanxi Province

日最高气温极小值、日最低气温极小值的变化趋势差异较大。冰冻日数减幅最大的地区出现在黄河沿岸的忻州市西部、吕梁市西部、临汾市西北部，减幅超过3.71 d·(10a)$^{-1}$，运城市减幅最小，不足1.43 d·(10a)$^{-1}$，90%台站的冰冻日数显著减少($P<0.05$)；霜冻日数减幅最大的地区位于运城市、临汾市南部、太原市西部，减幅超过3.84 d·(10a)$^{-1}$，大同市、忻州市西部、吕梁市西部、长治市、阳泉市南部地区减幅最小，少于2.56 d·(10a)$^{-1}$，83%台站的霜冻日数显著减少($P<0.05$)；日最高气温极小值增幅高值区主要位于忻州市西部和东北部、临汾市西部、大同市东部，增幅超过0.33 ℃·(10a)$^{-1}$，太原市、晋中市、阳泉市和晋城市大部、忻州市中部为增幅低值区，增幅小于0.20 ℃·(10a)$^{-1}$，13%台站的日最高气温极小值显著增加($P<0.05$)，主要位于增幅超过0.39 ℃·(10a)$^{-1}$的地区；日最低气温极小值增幅高值区主要位于朔州市大部、忻州市中部、太原市西部，增幅超过0.48 ℃·(10a)$^{-1}$，吕梁市西南部和临汾市东部为增幅低值区，增幅小于0.31 ℃·(10a)$^{-1}$，64%台站的日最低气温极小值显著增加($P<0.05$)。进一步对比日最高气温极大值、日最高气温极小值、日最低气温极大值、日最低气温极小值变化趋势的空间分布，发现极端最高(低)气温的极大、极小值均上升，73%台站的日最高气温极小值增幅超过日最高气温极大值的增幅，67%台站的日最低气温极小值增幅超过日最低气温极大值的增幅，即大部分地区极端气温极小值增温更快。对比山西省北中部半干旱区与南部半湿润区，半干旱区的冰冻日数减少速度快、日最低气温极小值增幅大，而半湿润区的霜冻日数减少速度更快。

3.3 平均气温变化特征

为探讨极端气温事件对气候变暖的响应，首先分析了年平均气温的变化特征。1960—2019年，山西省平均气温为9.6 ℃，1999年为最高值(10.8 ℃)，1984年为最低值(8.3 ℃)(图6)，1960—2019年气温呈显著变暖趋势，气候倾向率为0.26 ℃·(10a)$^{-1}$，即平均每10 a增加0.26 ℃，且气温上升趋势显著($P<0.001$)。20世纪60—80年代平均气温偏低，以20世纪90年代为转折点，由降温转变为升温，根据累积距平法的计算结果绘制平均气温的累积距平变化曲线(图7)，可判断气温变化的拐点为1997年。以1997年为分界点，1960—1996年平均气温的均值为9.2 ℃，1997—2019年平均气温均值为10.2 ℃，对1960—1996年和1997—2019年2个时段气温进行均值比较，t检验结果表明2个时段气温均值存在极显著差异($P<0.01$)。

山西省不同区域的多年平均气温在4.2~14.0 ℃之间(图8)，基本呈现南高北低的特点。运城市、临汾市南部、晋城市西南部的平均气温在12.0 ℃以上，为高值中心；北部偏西地区不足7.0 ℃，为低值中心。从气温变化趋势的空间分布来看，山西省不同区域年平均气温整体上呈一致的增暖趋势，其中有98%的台站的增温趋势显著($P<0.05$)。年平均气温变化幅度呈从东南向西北逐渐增大的分布格局，西部的黄河流域山西段为增幅较大区域，增幅最大区域主要位于朔州市西部、吕梁市西部、临汾市北部，平均每10 a增幅超过0.3 ℃；东部的海河流域山西段为增幅较小区域，增幅最小的区域主要位于晋城市东部、长治市东部、晋中市东部，平均每10 a增

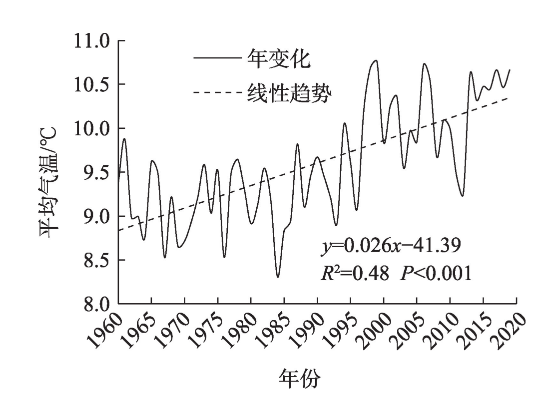


图6　1960—2019年山西省平均气温年际变化

Fig. 6　Annual variation of mean temperature in Shanxi Province from 1960 to 2019

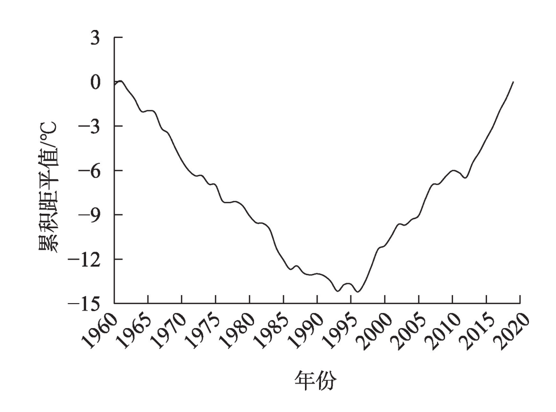


图7　山西省年平均气温累积距平曲线

Fig. 7　Cumulative anomaly curve of annual mean temperature in Shanxi Province

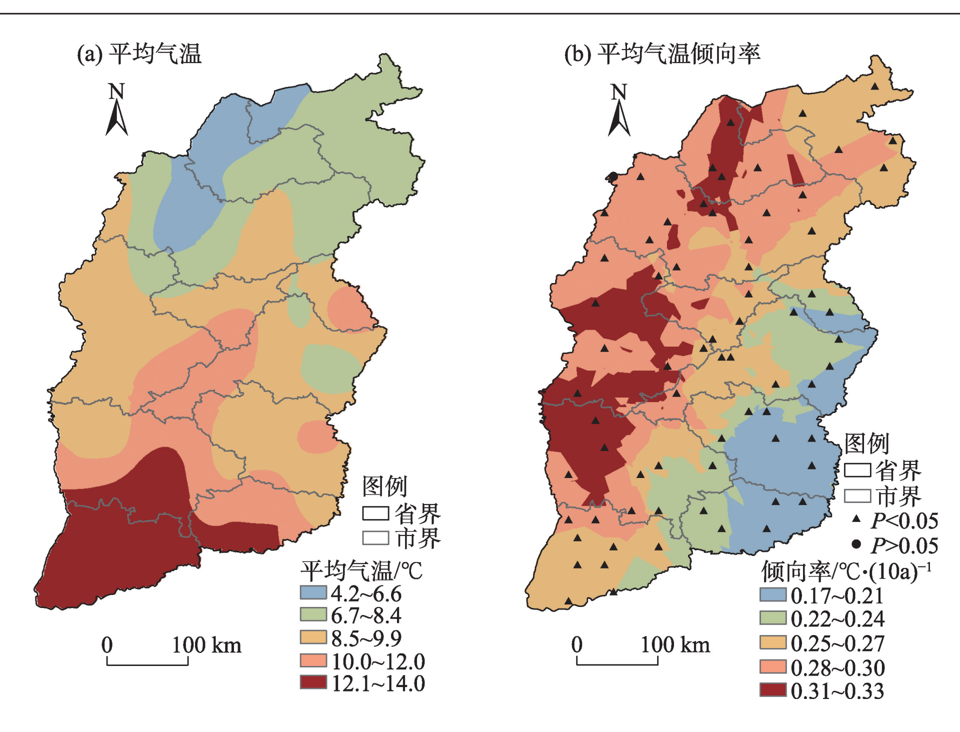


图8 山西省年平均气温及变化趋势的空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of the mean temperature and its linear trend in Shanxi Province

表2 各项极端气温指数与平均气温的相关系数

Tab. 2 Correlation coefficients between different extreme temperature indices and annual mean temperature

极端气温指数	SU	TR	TXx	TNx	ID	FD	TXn	TNn
相关系数	0.90**	0.91**	0.91**	0.96**	−0.92**	−0.97**	0.93**	0.94**

注：*、**分别表示通过0.05和0.01显著性水平检验。下同。

幅低于0.2 ℃。对比山西省北中部半干旱区与南部半湿润区，发现半干旱区平均气温增温幅度更大。

3.4 极端气温指数对区域增暖的响应

为研究山西省极端气温指数与区域性增暖的关系，计算各项极端气温指数与平均气温的相关系数(表2)，发现夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值、日最高气温极小值、日最低气温极小值与平均气温显著正相关($P<0.01$)，冰冻日数、霜冻日数与平均气温显著负相关($P<0.01$)。各极端气温指数与平均气温相关性均通过了0.01的显著性水平，说明各极端气温指数对气候变暖具有较好的响应，其中霜冻日数与平均气温相关系数最高，表明霜冻日数对于山西省区域增暖的响应最显著，其次为日最低气温极大值。随着平均气温的上升，夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值、日最高气温极小值、日最低气温极小值显著增加，冰冻日数、霜冻日数显著减少。

为进一步分析区域增暖对极端气温指数的影响，

表3 1960—1996年与1997—2019年极端气温指数的变化

Tab. 3 Changes of extreme temperature indices in 1960—1996 and 1997—2019

指数	1960—1996年	1997—2019年	差值
SU/d	100.86	113.21	12.35
TR/d	15.33	20.99	5.67
TXx/℃	35.25	36.12	0.87
TNx/℃	22.38	23.33	0.94
ID/d	34.09	26.08	−8.01
FD/d	145.83	134.49	−11.34
TXn/℃	−8.01	−7.80	0.21
TNn/℃	−20.48	−19.80	0.68

以平均气温变化的拐点1997年为界，计算1997—2019年与1960—1996年不同极端气温指数的差值(表3)。相比1960—1996年，1997—2019年平均气温上升了1.0 ℃，夏季日数、热夜日数分别增多了12.35 d、5.67 d，冰冻日数、霜冻日数分别减少了8.01 d、11.34 d，日最低气温极大值、日最高气温极大值、日最低气温极小

表4　各项极端气温指数与地理因子的相关系数

Tab. 4　Correlation coefficients between different extreme temperature indices and geographical locations

地理因子	SU	TR	TXx	TNx	ID	FD	TXn	TNn
经度	-0.41**	-0.54**	-0.48**	-0.54**	0.30*	0.51**	-0.29*	-0.38**
纬度	-0.60**	-0.73**	-0.60**	-0.73**	0.89**	0.85**	-0.87**	-0.86**
海拔	-0.97**	-0.88**	-0.97**	-0.94**	0.86**	0.84**	-0.89**	-0.80**

值、日最高气温极小值依次升高了0.94 ℃、0.87 ℃、0.68 ℃、0.21 ℃，意味着随着平均气温的升高，研究区未来存在更大的高温热浪风险。

3.5　极端气温指数与地理因子相关性分析

为衡量地理因子对极端气温指数的影响，分析了各项极端气温指数与地理因子的线性相关系数（表4）。结果表明，夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值、日最高气温极小值、日最低气温极小值均与经度、纬度、海拔高度显著负相关（$P<0.05$），冰冻日数、霜冻日数则与经度、纬度、海拔高度显著正相关（$P<0.05$），即随着经度、纬度或海拔高度的增加，夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值、日最高气温极小值、日最低气温极小值显著减少，冰冻日数、霜冻日数显著增加。同时，暖指数中夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值与海拔高度的相关程度最高；冷指数中冰冻日数、霜冻日数、日最高气温极小值、日最低气温极小值与纬度、海拔高度的相关程度均较高。

4　讨 论

本文在研究山西省极端气温指数区域差异时，得出的暖指数、冷指数变化趋势与前面引言中提到的一些研究者对中国地区极端气温事件的研究结果一致[15]，但山西省冰冻日数减少速度更快，日最高气温极小值、日最低气温极小值增幅偏慢。研究表明，随着山西省平均气温的升高，研究区未来存在更大的高温热浪潜在风险，与王岱等[30]得出的中国地区的变化趋势一致。针对不同气候区暖指数和冷指数的变化趋势的分析发现，山西省半干旱区的日最低气温极小、极大值增温更快，冰冻日数减少速度快；半湿润区的热夜日数增加速度更快，霜冻日数减少速度更快，而姬霖等[28]针对渭河流域半湿润区和半干旱区极端气温变化趋势的研究发现暖指数和冷指数均表现为半干旱区增暖高于半湿润区，说明特殊的地理环境使得山西省不同气候区极端气温事件变化更为复杂。总体来看，山西省极端气温指数变化幅度均高于渭河流域，但低于黄土高原地区的平均水平[28,31]。

《巴黎协定》提出，相对于工业化革命前期，力争在21世纪内将全球气温上升幅度控制在2 ℃以内的目标[2]，在这一目标下，研究全球变化2 ℃情景下极端气温事件的变化趋势，对有效制定相关气候变化决策具有重要的意义。本研究得出的极端气温指数对区域气候变暖的响应差异，可为预测和评估未来气候变化情景下极端气温事件的影响提供参考。影响极端气温变化的原因极其复杂，除了本文提及的几个方面，还包括诸如大尺度的大气环流变化[19]、城市化[15]、地表覆盖[32]等多方面的因素，有待于更进一步深入的研究。

5　结 论

本研究通过分析1960—2019年山西省极端气温事件的变化特征及其对区域变暖的响应，主要得出以下结论：

（1）近60 a，从时间变化来看，暖指数中夏季日数、热夜日数、日最低气温极大值显著增加，冷指数中冰冻日数、霜冻日数显著减少，日最低气温极小值显著增加；空间变化来看，山西省各地夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值、日最高气温极小值、日最低气温极小值均为增加趋势，冰冻日数、霜冻日数为减少趋势。

（2）对比各地日最高气温极大值、日最高气温极小值、日最低气温极大值、日最低气温极小值的变化趋势，发现极端气温的极大、极小值均上升，且大部分地区极端气温的极小值增温幅度更大。

（3）山西省平均气温呈显著变暖趋势，平均每10 a增加0.26 ℃，空间上气温增幅呈从东南向西北逐渐增大的趋势。各极端气温指数对气候变暖具有较好的响应，其中霜冻日数对于山西省区域增暖

的响应最显著，其次为日最低气温极大值。

（4）暖指数中夏季日数、热夜日数、日最高气温极大值、日最低气温极大值与海拔高度的相关程度最高；冷指数中冰冻日数、霜冻日数、日最高气温极小值、日最低气温极小值与纬度、海拔高度的相关程度均较高。

（5）针对不同气候区暖指数和冷指数的变化趋势进行分析，发现山西省半干旱区的日最低气温极小、极大值增温更快，冰冻日数减少速度快；半湿润区的热夜日数增加速度快，霜冻日数减少速度快。

参考文献（References）

[1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] IPCC. Special report on global warming of 1.5 ℃[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.

[3] IPCC. Climate change 2021: Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[4] 孙颖. 人类活动对气候系统的影响——解读IPCC第六次评估报告第一工作组报告第三章[J]. 大气科学学报, 2021, 44(5): 654-657. [Sun Ying. Impact of human activities on climate system: An interpretation of Chapter Ⅲ of WGI report of IPCC AR6[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 44(5): 654-657.]

[5] Leonard M, Westra S, Phatak A, et al. A compound event framework for understanding extreme impacts[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2013, 5(1): 113-128.

[6] Hao Z C, Aghakouchak A, Phillips T J. Changes in concurrent monthly precipitation and temperature extremes[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(3): 1402-1416.

[7] 张调风, 杨昭明, 温婷婷, 等. 青藏高原东北部区域持续性低温事件的特征及影响因子分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(4): 897-905. [Zhang Tiaofeng, Yang Zhaoming, Wen Tingting, et al. Characteristics and influencing factors of persistent low temperature events in northeast Qinghai-Tibet Plateau[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(4): 897-905.]

[8] 殷聪, 杨飞. "一带一路"区域极端气候事件变化及其对典型农业区生长季的影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(6): 463-474. [Yin Cong, Yang Fei. Variation of extreme climate events in "One Belt and One Road" region and its impact on the growing season in typical agricultural regions[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2021, 42(6): 463-474.]

[9] 翟盘茂, 刘静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. 中国工程科学, 2012, 14(9): 55-63. [Zhai Panmao, Liu Jing. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(9): 55-63.]

[10] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111 (D5): 1042-1063.

[11] Sheridan S C, Lee C C. Temporal trends in absolute and relative extreme temperature events across North America[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2018, 123(21): 11889-11898.

[12] Kothawale D R, Revadekar J V, Kumar K R. Recent trends in premonsoon daily temperature extremes over India[J]. Journal of Earth System Science, 2010, 119(1): 51-65.

[13] Titkova T B, Cherenkova E A, Semenov V A. Regional features of changes in winter extreme temperatures and precipitation in Russia in 1970—2015[J]. Journal Ice and Snow, 2018, 58(4): 486-497.

[14] Peterson T C, Folland C, Gruza G, et al. Report on the activities of the working group on climate change detection and related rapporteurs 1998—2001[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2001.

[15] 周雅清, 任国玉. 中国大陆1956—2008年极端气温事件变化特征分析[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 405-417. [Zhou Yaqing, Ren Guoyu. Variation characteristics of extreme temperature indices in mainland China during 1956—2008[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 405-417.]

[16] 黄小燕, 王小平, 王劲松, 等. 1960—2013年中国沿海极端气温事件变化特征[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 612-620. [Huang Xiaoyan, Wang Xiaoping, Wang Jinsong, et al. Variation of extreme temperature events in coastal region of China in 1960—2013[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(4): 612-620.]

[17] 高婧, 李胜楠, 井立红, 等. 新疆塔城地区极端气温变化特征及其影响因子分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(2): 346-359. [Gao Jing, Li Shengnan, Jing Lihong, et al. Varialility characteristics of extreme temperature and its influencing factors in Tacheng Prefecture, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 346-359.]

[18] 靳铮, 游庆龙, 吴芳营, 等. 青藏高原三江源地区近60 a气候与极端气候变化特征分析[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 1042-1055. [Jin Zheng, You Qinglong, Wu Fangying, et al. Changes of climate and climate extremes in the three-rivers headwaters' region over the Tibetan Plateau during the past 60 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 1042-1055.]

[19] 陈锐杰, 刘峰贵, 陈琼, 等. 近60年青藏高原东北缘极端气温事件与气温日较差分析——以西宁地区为例[J]. 高原气象, 2018, 37(5): 1188-1198. [Chen Ruijie, Liu Fenggui, Chen Qiong, et al. Variations of extreme air temperature events and diurnal temperature range in Xining, northeastern Qinghai-Tibetan Plateau from 1955 to 2015[J]. Plateau Meteorology, 2018, 37(5): 1188-1198.]

[20] 张扬, 白红英, 苏凯, 等. 1960—2013年秦岭陕西段南北坡极端气温变化空间差异[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1296-1308. [Zhang Yang, Bai Hongying, Su Kai, et al. Spatial variation of extreme temperature change on southern and northern slopes of Shaanxi

section in Qinling Mountains during 1960—2013[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1296-1308.]

[21] 王钊, 彭艳, 魏娜. 近52 a秦岭南北极端温度变化及其与区域增暖的关系[J]. 干旱气象, 2016, 34(2): 269-275. [Wang Zhao, Peng Yan, Wei Na. Variation trends of the extreme temperature and its relationship with regional warming in the south and north sides of the Qinling Mountain during 1961—2012[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(2): 269-275.]

[22] 杜军, 路红亚, 建军. 1961—2010年西藏极端气温事件的时空变化[J]. 地理学报, 2013, 68(9): 1269-1280. [Du Jun, Lu Hongya, Jian Jun. Variations of extreme air temperature events over Tibet from 1961 to 2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(9): 1269-1280.]

[23] 冯晓莉, 多杰卓么, 李万志, 等. 1961—2018年青海高原极端气温指数时空变化特征[J]. 干旱气象, 2021, 39(1): 28-37. [Feng Xiaoli, Duo Jiezhuome, Li Wanzhi, et al. Spatiotemporal variations of extreme temperature indices over Qinghai Plateau during 1961—2018[J]. Journal of Arid Meteorology, 2021, 39(1): 28-37.]

[24] 申红艳, 马明亮, 王冀, 等. 青海省极端气温事件的气候变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1371-1378. [Shen Hongyan, Ma Mingliang, Wang Ji, et al. Variation characteristics of extreme air temperature events in Qinghai Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1371-1378.]

[25] 张先平, 张彦军, 王孟本. 山西高原植被景观空间特征分析[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(1): 214-220. [Zhang Xianping, Zhang Yanjun, Wang Mengben. Spatial characters of vegetation landscape in Shanxi Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(1): 214-220.]

[26] 上官铁梁. 山西植被的水平地带性分析[J]. 山西大学学报(自然科学版), 1989, 12(1): 104-111. [Shangguan Tieliang. Analysis of the horizontal zonality of the vegetation in Shanxi Province[J]. Journal of Shanxi University (Natural Science Edition), 1989, 12(1): 104-111.]

[27] 秦浩, 董刚, 张峰. 山西植物功能型划分及其空间格局[J]. 生态学报, 2015, 35(2): 396-408. [Qin Hao, Dong Gang, Zhang Feng. Classification of plant functional types and spatial pattern in Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 396-408.]

[28] 姬霖, 段克勤. 1960—2017年渭河流域极端气温变化及其对区域增暖的响应[J]. 地理科学, 2020, 40(3): 466-477. [Ji Lin, Duan Keqin. Variations of extreme temperature and its response on regional warming in the Weihe River Basin during 1960—2017[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(3): 466-477.]

[29] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007. [Wei Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and forecasting technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007.]

[30] 王岱, 游庆龙, 江志红, 等. 基于均一化资料的中国极端地面气温变化分析[J]. 高原气象, 2016, 35(5): 1352-1363. [Wang Dai, You Qinglong, Jiang Zhihong, et al. Analysis of extreme temperature changes in China based on the homogeneity-adjusted data[J]. Plateau Meteorology, 2016, 35(5): 1352-1363.]

[31] 杨维涛, 孙建国, 康永泰, 等. 黄土高原地区极端气候指数时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1456-1466. [Yang Weitao, Sun Jianguo, Kang Yongtai, et al. Temporal and spatial changes of extreme weather indices in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1456-1466.]

[32] Wu L Y, Zhang J Y, Dong W J. Vegetation effects on mean daily maximum and minimum surface air temperatures over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(9): 900-905.

Interannual variations of extreme air temperature events and its response to regional warming in Shanxi Province in recent 60 years

LI Na[1], WU Yongli[1], ZHAO Guixiang[1], QIAN Jinxia[1], LI Fen[2], ZHAO Haiying[1], HAN Pu[1]

(1. Shanxi Meteorological Observatory, Taiyuan 030006, Shanxi, China; 2. Meteorological Disaster Prevention Technology Center of Shanxi Province, Taiyuan 030032, Shanxi, China)

Abstract: Extreme temperature is an important indicator of climate change. Under the background of global warming, disaster events (warm winter, drought, and heat wave) caused by extreme temperature changes are also becoming increasingly frequent, which pose a serious threat to the ecological system and agricultural production. Therefore, studying and predicting the occurrence of extreme temperature events are particularly important. On the basis of the daily maximum, minimum, and average temperature data of 70 meteorological stations, eight extreme temperature indices were analyzed to obtain spatial and temporal variations of extreme temperature events, and their response to regional warming was examined in Shanxi Province, China, from 1960 to 2019. The following results are presented. (1) The occurrence of summer days, tropical nights, annual maximum value of daily minimum temperature, and annual minimum value of daily minimum temperature showed a significant upward trend, whereas the occurrence of ice and frost days showed a significant downward trend. (2) The annual maximum or minimum value of daily maximum and minimum temperatures showed warming trends, and the change rates of annual minimum value of daily maximum and minimum temperatures were large in most regions. (3) The annual average temperature in the study area presented a statistically significant increasing trend at a rate of 0.26 ℃·$(10a)^{-1}$. The spatial distribution of the warming rate increased from southeast to northwest. The changes in extreme temperature indices demonstrated remarkably significant responses to climate warming. The responses of frost days and annual maximum value of daily minimum temperature to regional warming were highly sensitive. (4) In semiarid regions of Shanxi Province, the rising rate of annual maximum and minimum values of daily minimum temperature was large and ice days had a rapid reduction. In the semihumid area of Shanxi Province, tropical nights demonstrated rapid increase, whereas frost days revealed a rapid reduction.

Key words: extreme temperature indices; spatiotemporal variations; climate change; Shanxi Province